

УДК 620.91

Н. Б. Лошкарев^{1,2}, В. А. Носков¹, Г. М. Дружинин^{1,2}

¹ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Аннотация

Описана двумерная математическая модель нагрева металла в методической печи с шагающими балками. Математическое описание нагрева металла включает дифференциальное уравнение теплопроводности, с начальными и граничными условиями. В модели учтены зависимости теплофизических свойств нагреваемого металла от температуры. Смоделирован процесс нагрева пластины по заданному режиму с переменной во времени нагрузкой в пакете Ansys. Определено распределение температур по сечению заготовки на выходе из печи. Полученные результаты виртуального опыта были сопоставлены с данными промышленного эксперимента, проведенного на реальном объекте металлургического предприятия. Сравнение вычислений адаптированной математической модели с данными промышленного эксперимента показали совпадение 97 %. Сформулированы перспективы применения математической модели для АСУ тепловой работы печи.

Ключевые слова: методическая печь, уравнение теплопроводности, метод конечных разностей, математическая модель.

Abstract

The paper describes a two-dimensional mathematical model of metal heating in the continuous walking beam reheating furnace. The mathematical description of metal heating includes a differential thermal conductivity quotation with initial and boundary conditions. The model incorporates dependencies between the thermophysical properties of heated metal and temperature. The process of pre-set plate heating with a time variable load was modeled in Ansys software. Distribution of temperatures over the slab section at the furnace exit was determined. The obtained results of the virtual experiment were compared with the data of the industrial experiment carried out at the existing plant of a steel production factory. The comparison between the calculations of the adapted mathematical model and data of the industrial experiment showed a coincidence of 97 %. The prospects for further use of the mathematical model in the automated control system of furnace thermal operation were defined.

Key words: continuous reheating furnace, thermal conductivity quotation, finite difference method, mathematical model.

Нагрев слэба в методической печи является одной из ключевых ступеней технологического процесса прокатного производства. Основное внимание уделяется достижению заданных температур и их распределению по поверхности и сечению нагреваемого металла. Неоптимизированный расход топлива при достижении этих температур ведёт к повышенной себестоимости выпускаемой продукции [1]. Задача энергосбережения решается путём создания быстродействующей математической модели расчета нагрева металла в методической

печи. Такая модель позволяет реализовать автоматическое управление процессом нагрева с определением температурного поля в сечении заготовок при их транспортировке по печи. Наличие модели способствует проведению расчетов нагрева металла в печи, связанных с изменениями производительности, сортамента металла и темпа выдачи заготовок [2]. Для решения задач данного типа использовался метод конечных разностей [3].

Схема отопления печи. На рисунке 1 представлена общая конструкция печи. Печь оборудована 133 горелками BLOOM (США). Отопление осуществляется смесью природного и доменного газов. Схема расположения горелок приведена ниже на рисунке 2. Горелки верхних зон оборудованы излучающими плоскопламенными горелками. Они расположены в своде чередующимися рядами в шахматном порядке до зоны выравнивания, состоящими из 7 и 8 горелок. Нижние подзоны 4 и 6 оборудованы трехпроводными горелками с регулируемой длиной факела. Они расположены друг против друга на боковых стенках печи и на такой высоте, что их пламя проходит под нижними поверхностями слябов. Верхняя зона выравнивания отличается от других верхних зон тем, что она разделяется на центральную подзону 7 и периферийную подзону 8, мощности нагрева которых можно регулировать независимо друг от друга. Зоны состоят из трёх рядов горелок, каждый ряд горелок состоит из 4 центральных горелок и 4 внешних горелок, последние распределены попарно слева и справа. Зона «Экран» имеет только один ряд из 8 сводовых горелок. Она имеет автономное регулирование нагрева. Экран выполняет две задачи: создаёт тепловой барьер, ограничивающий подсос воздуха при открытии заслонок выгрузки; компенсирует значительные тепловые потери рядом с заслонками и, таким образом, позволяет избежать чрезмерного охлаждения слябов в ожидании выгрузки, когда простой по выгрузке превышает нормальный промежуток времени. Боковые горелки снабжены также ручным отсечным дросселем. В подзоне 2 предварительного нагрева первые 3 нижних боковых горелки, с разных сторон печи, снабжены автоматическими отсечными клапанами. Первые 3 ряда горелок на своде верхней подзоны 1 предварительного нагрева также снабжены автоматическими отсечными клапанами. Для регулирования длины факела боковые горелки зон I и II нагрева снабжены двухконтурными клапанами на подводе воздуха, регулирующими подачу воздуха в центр факела или на периферию. Распределение газа по разным зонам осуществляется с помощью трубопроводов разного диаметра.

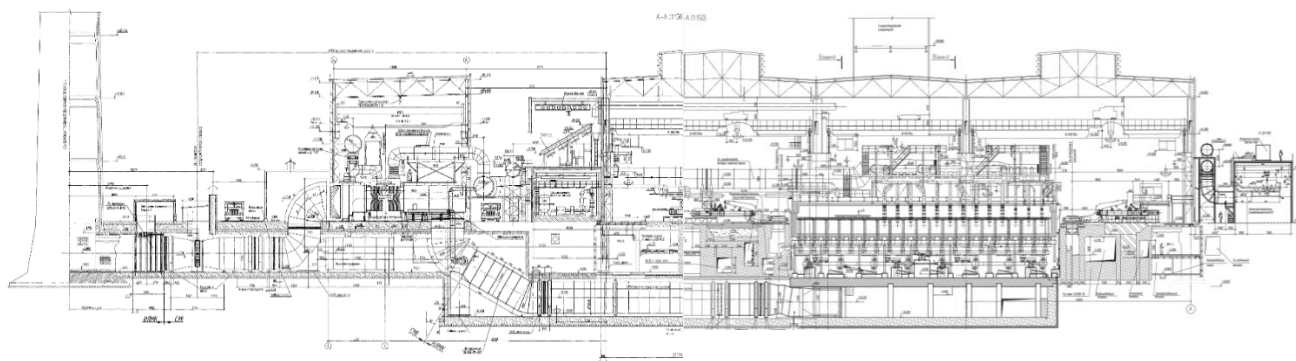


Рис. 1. Конструкция методической печи с шагающими балками

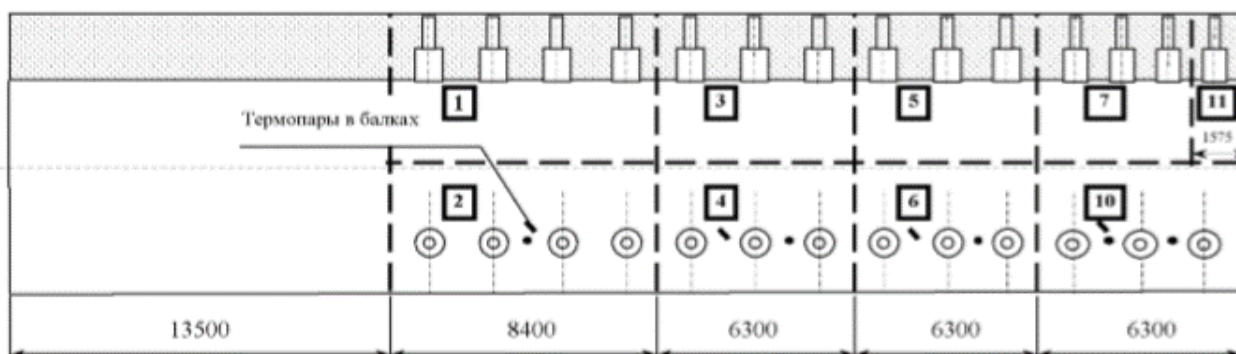


Рис. 2. Схема расположения горелок

Математическая модель нагрева металла. Математическое описание нагрева металла включает двумерное дифференциальное уравнение теплопроводности (1) для пластины с учётом зависимости теплофизических свойств нагреваемого материала от температуры (5)–(7). Также уравнение дополняется начальными (2) и граничными условиями (3), (4). Для проверки адекватности модели, использовались результаты экспериментальных исследований процесса нагрева слябов в печах с шагающими балками стана 2000 ЦГП ПАО НЛМК (Цех горячей прокатки Новолипецкого металлургического комбината). В экспериментальном слябе из низкоуглеродистой стали 08ю разместили десять термопар. Схема размещения термопар представлена на рисунке 2. Температурный режим нагрева представлен в таблице. С использованием автономного регистратора температуры и программно-измерительного комплекса были получены функции изменения среднемассовых температур [5].

Уравнение теплопроводности Фурье:

$$\rho(T)c(T)\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right). \quad (1)$$

Начальное условие:

$$T(x, y, T_0) = \phi(x, y). \quad (2)$$

Граничные условия для верхней поверхности сляба:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \sigma \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right]. \quad (3)$$

Граничные условия для нижней поверхности сляба:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\alpha_1(T_s - T_T)}{1 + \left(\frac{x}{R} \right)^2} - \alpha_2(T_s - T_m). \quad (4)$$

Зависимость теплопроводности от температуры:

$$\lambda(T) = \begin{cases} 1,35 \cdot 10^{-5}t^2 - 5,24 \cdot 10^{-2}t + 63,48, & 0 \leq t \leq 850; \\ 9,38 \cdot 10^{-6}t^2 - 1,07 \cdot 10^{-2}t + 29,04, & 850 \leq t \leq 1200. \end{cases} \quad (5)$$

Зависимость плотности от температуры:

$$\rho(T) = \begin{cases} -0,355t + 7875, & \text{при } 0 \leq t \leq 850; \\ 0,098t + 7508, & \text{при } 800 \leq t \leq 900; \\ -0,542t + 8086, & \text{при } 900 \leq t \leq 1200. \end{cases} \quad (6)$$

Зависимость теплоёмкости от температуры:

$$c(T) = \begin{cases} 4,45 \cdot 10^{-9}t^3 - 3,80 \cdot 10^{-6}t^2 + 1,3 \cdot 10^{-3}t + 0,412, \\ \text{при } 0 \leq t \leq 750; \\ -1,81 \cdot 10^{-8}t^3 + 5,84 \cdot 10^{-5}t^2 - 6,23 \cdot 10^{-2}t + 22,64, \\ \text{при } 750 \leq t \leq 1200. \end{cases} \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

x – координата по длине печи, м;

y – координата по толщине заготовки, м;

C – теплоемкость, Дж/К;

τ – время, с;

ρ – плотность, кг/м³;

σ, σ_2 – приведенные коэффициенты теплообмена излучением, Вт/(м²·К⁴);

T_m – температура нагреваемого материала, К;

T_s – температура греющей среды, К;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от среды к трубе, Вт/м²К;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от среды к материалу, Вт/м²К;

T_T – температура наружной поверхности теплоизолированной балки, К;

R – радиус опорной теплоизолированной балки, м.

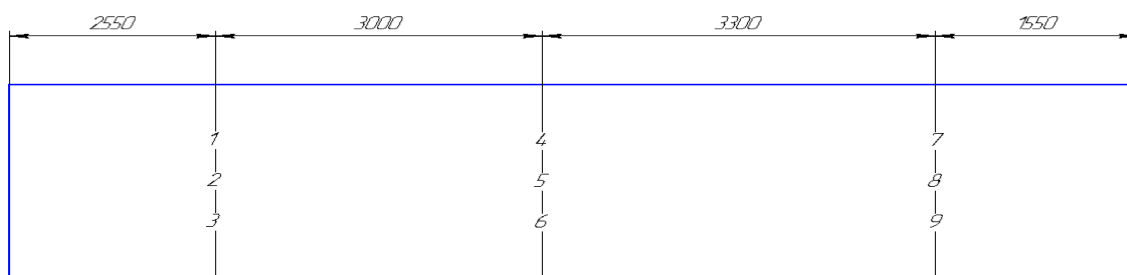


Рис. 3. Схема размещения и установки термопар в слябе
(глубина погружения термопар: 1,4,7 – 30 мм; 2,5,8 – 125 мм; 3,6,9 – 240 мм)

Параллельно промышленному эксперименту в программном комплексе Ansys 14.5 смоделирован процесс нагрева сляба по заданному режиму (таблица) с переменной во времени нагрузкой [6]. Введены в программу теплофизические (теплоёмкость, плотность, коэффициент теплопроводности) и геометрические параметры материала. Результаты опыта представлены на рисунке 4 в виде распределения температур по толщине заготовки.

Таблица

Нагрев сляба по заданному режиму

Зона	Предварительная	Первого нагрева	Второго нагрева	Выравнивания температур
Время от начала нагрева, с	4245	7430	10615	13800
Температура, °С	1220	1263	1328	1261

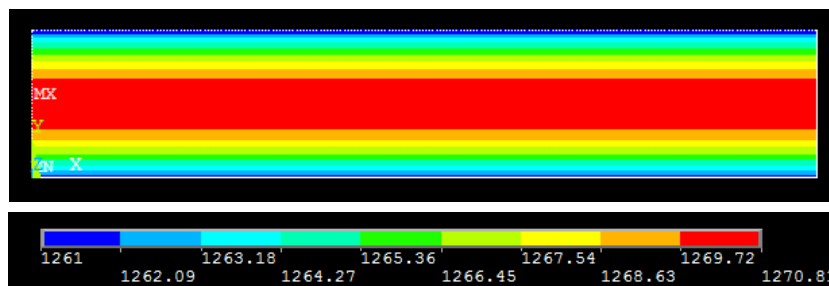


Рис. 4. Распределение температур по толщине сляба

Заклучение. В ходе проведения промышленного эксперимента на реальном объекте и виртуального опыта в программе Ansys были получены графики изменения среднемассовой температуры во времени (рисунок 5). Сравнение вычислений адаптированной математической модели с данными промышленного эксперимента показали совпадение 97 %. Результаты позволяют в дальнейшем адаптировать математическую модель в отношении степени черноты эффективного излучения для каждой зоны и произвести наладку топливосжигающих устройств. Полученная адаптированная математическая модель позволяет с использованием компьютерных программ проанализировать практически любое число вариантов, и выбрать оптимальные условия тепловой работы методической печи для нагрева того или иного металла различного сортамента. Поэтому для решения задачи оптимизации расхода топлива и калибровки тепловых режимов методической нагревательной печи с шагающими балками стана 2000 ПАО «НЛМК» рекомендовано использовать полученную математическую модель.

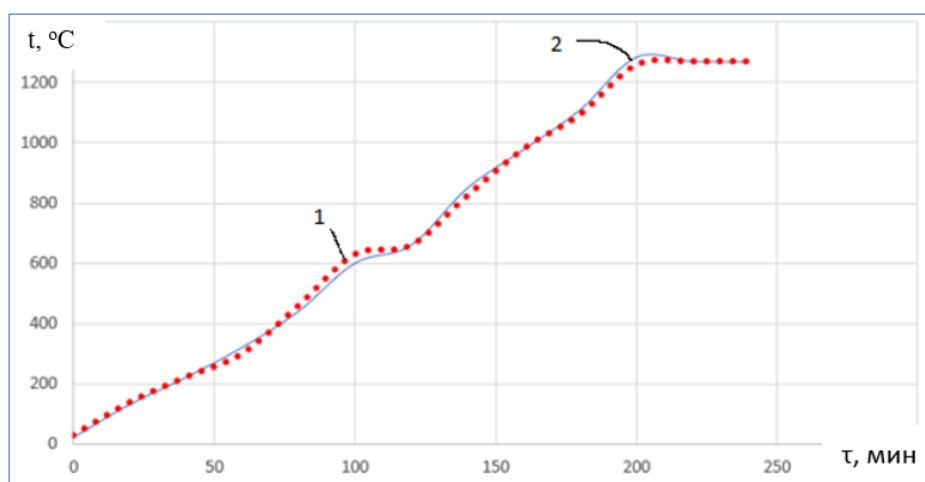


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (2) и расчетных (1) среднемассовых температур при нагреве сляба

Список использованных источников

1. Тутарова В.Д., Калитаев А.Н., Закирова Р.А. Математическое моделирование нагрева сляба в методической печи // Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – С. 75.

2. Попов Е.В., Дружинин Г.М., Адаптация математической модели расчёта нагрева металла для АСУ на примере толкательной печи стана 2800 ОАО «Уральская Сталь» // Екатеринбург: УрФУ, 2015 – 264 с.

3. Портал компании Ansys. URL <https://www.ansys.com>.

4. Алтыева М.Ч. Математическое моделирование процесса нагрева сляба, как компонент управления технологическим процессом // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». – Липецк: ЛГТУ, 2015 – 10 с.

5. Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Ладыгичев М.Г., Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса: учебник для вузов. – М.: «Интермет-Инжиниринг», 1999. – 520 с.

6. Дождиков В.И., Ганул А.О., Мордовкин Д.С. Оптимизация работы энерготехнологического комплекса нагрева металла перед прокаткой // Сталь. 2018. №2. С. 69-71.

7. Денисов М.А. Автоматизированное проектирование в Ansys и Компас-3D. Электронное издание. – Екатеринбург: УрФУ, 2015 – 264 с.

8. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Metallurgia, 1990 – 239 с.

УДК 621.365.4

И. Д. Лядов, Е. В. Киселев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КАМЕРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация

В работе исследована тепловая работа камерной электрической печи сопротивления ЦЭП 289 для нагрева мелкосерийной продукции. Рассчитан нагрев металла. Составлен тепловой баланс действующей печи, определены КПД печи и удельный расход электроэнергии. Проанализирована работа печи, выявлены основные ее недостатки, предложены эффективные мероприятия для технического перевооружения печи и снижения потребления энергии, такие как замена футеровки на более современные материалы с низкими коэффициентами теплопроводности. На основе замены футеровки, составлен новый тепловой баланс, проанализирована работа модернизированной печи, определены новые КПД печи и удельный расход электроэнергии. При реализации предложенных мероприятий можно ожидать значительного снижения энергопотребления при производстве мелкосерийной продукции.

Ключевые слова: камерная электрическая печь сопротивления, нагрев, термообработка, конструкция, тепловой баланс, мощность.

Abstract

The thermal operation of the chamber electric resistance furnace SNZ 6.3 for heating small-scale production was investigated. The heating of the metal is calculated. The thermal balance of the